

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 7 月 1 日現在

機関番号：84310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K03230

研究課題名（和文）中国周代青銅鐘の機能研究

研究課題名（英文）The Functional Study of Bronze Bells in Zhou Period

研究代表者

廣川 守（HIROKAWA, MAMORU）

公益財団法人泉屋博古館・学芸課（本館）・館長

研究者番号：30565586

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンによる型取りによって、春秋戦国時代の青銅鐘鑄型製作において削り中子法が採用されていたことを明らかにした。この方法により、型持の位置を一定に保つことが可能となり、さらに器の厚みを一定に維持することが容易となり、規格化されたセットを製作するうえで極めて効率的な作業工程により鑄造されていたことが判明した。

上記知見をもとに鑄造した復元品の音高・音響を測定した結果、鼓部をたたいた場合、叩いてから3秒程度は、遂音と鼓音の2音が併存する状況が確認できた。さらに熱処理をかけた方が混在する時間が短く、一つの音に収斂した残響が続く可能性が高いこともわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中国殷周時代の青銅祭器の製作方法のうち、鑄型製作について従来から様々な議論がなされてきたが、近年、削り中子法の採用を支持する研究は極めてまれな状況であった。本研究において、削り中子法が採用されていたことが明らかになり、この時期の鑄型製作方法に新たな視点を提供できた。

また今回の鐘の音高・音響調査により、叩く位置によって2種類の音の混在状況が変化すること、熱処理によってその混在時間が短縮され、一つの音に収斂した残響が続く可能性を提示することができ、鐘の音高測定研究に残響の検討が必要なことを示唆した。

研究成果の概要（英文）：By molding with silicon, We have made clear the adoption of the shaving core technique for making bronze bell molds in Spring and Autumn Period. This technique made it possible to fix the mold in same place, and made it easy to keep the thickness of the vessel constant. A highly efficient working process was used to produce the standardized set.

We measured the pitch and reverberation of the restored product cast based on the above considerations. As a result, when hitting the side of the bell, it was confirmed that the sounds of two frequencies coexist for about 3 seconds after hitting. Furthermore, it was found that the heat treatment shortened the mixing time of the two sounds and obtained a reverberation that converged on one sound.

研究分野：中国古代青銅器

キーワード：中国春秋戦国時代 青銅鐘 製作技法 音高と音響

1. 研究開始当初の背景

中国殷周時代青銅祭器のうち青銅打楽器の鐘は、周時代において、煮炊具の鼎とともに祭祀儀礼の中心的存在として重要な地位を占めた。とくに礼楽制度のもと、青銅祭器の使用が規定された西周時代後半期以降、青銅鐘は7ないし8の倍数個の大小相似形セット(編鐘)で製作・使用された。さらに青銅祭器が衰退した漢時代にも引き続き製作され、東アジアにおける釣鐘の原点となったのである。そのため、周代の青銅鐘は金属製打楽器の源流ということができ、その構造を解明することは考古学のみならず音楽の歴史を考える上でも重要である。

編鐘の研究は、1980年代から本格化した。その契機となったのが湖北省随県(現在の随州市)で出土した曾侯乙編鐘(戦国時代初期)の調査であった。これは64点の編鐘と1点の罍からなる中国史上最大のセットで、華覚明を中心とした研究グループが、その設計構造、材質、音高など総合的な調査と復元を試みた(引用文献①)。同じ頃、日本でも泉屋博古館の研究グループが同館所蔵編鐘について、考古学的調査と音高測定調査を実施し、戦国時代の編鐘の設計構造と音高設計について考察した(引用文献②)。以降、増加した出土品の音高測定調査や材質調査がいくつか実施されているが、編鐘の構造とその機能性について、全容が解明されたとは言い難い状況にある。その理由を以下に列挙すると、

- ・構造を把握するために必要不可欠な計測のうち鐘内側の計測が不十分で、厳密な構造把握が困難であったこと。鐘は内側で音を響かせるため、内部の形状が極めて重要になってくる。ところが周代の鐘は内面がフラットではなく凹凸が存在するため、従来の定規目測による正確な実測が困難であった。同時に内范(中子)の製作技法研究も進んでいないのが現状である。

- ・器厚がほかの殷周青銅祭器に比べ非常に厚く、破片ではなくほぼ完形で出土することが多く、小切片をサンプリングする必要がある金属組織観察が進んでいないこと。基本的に近世以降の伝統金属工芸において、青銅打楽器は鑄造後熱処理を行い、音の響きなどを整えている。最近、湖北省随州で出土した編鐘破片の組織観察が行われ、熱処理の可能性が指摘されているが、周時代にその技法が普及していたかどうか、楽器として機能に直接関わる点が曖昧なままである。

- ・鐘のうち釣手部が棒状になった甬鐘は非常に大きな凸乳が規則的に並んでいるが、その存在理由が不明なままであること。凸乳が単なる装飾でなく機能的な役割を持っていたのかどうかを検証した研究事例は無い。

上記問題点は、東アジアにおける青銅製打楽器の形成を考える上でも極めて重要な課題である。幸い、近年、新たな測定技術の開発が進んだことにより、上記課題をクリアできる素地が整いつつある。

2. 研究の目的

本研究は、先に列挙した問題点を中心に検討するため、鐘構造の把握とそれをもとにした復元鑄造、さらには金属製打楽器の機能を大きく左右する鑄造後の熱処理について考察する。とくに青銅鐘の機能的側面に焦点を当て、当時の青銅鐘の性格を明らかにすることを目的とする。

とくに復元鑄造は単に周代鐘と同じ構造のものを復元して当時の鑄造技術を検証するのではなく、鐘の機能性を解明するため、熱処理の有無、凸乳の有無、内面調整痕の有無など様々な条件で、同じ形状・規模の鐘を複数個鑄造する。それらを同一条件で叩き、録音した音声データを音声解析ソフトによって周波数、残響減衰度などを計測して、周代鐘と同一構造の鐘と条件を変えた鐘とでどのような違いが存在するのかを明らかにする。それによって、当時の鐘の鑄造技術を明らかにするとともに、機能的にどのようなレベルにあったのかを検証することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 周代青銅鐘に対する多角的検討

考古学、理化学、鑄造技術史学など様々な視点から検討をすすめる。すなわち形態的研究では、主に鐘内面形状の詳細な検証を通して、内范(中子)製作技法を検討する。また材料科学的研究では、主に熱処理の有無を確認するための金属組織観察を中心にしながら、蛍光X線分析による組成分析も併せて実施する。これらの研究成果をもとにして、様々な条件を設定しながら復元鑄造品を制作し、それをもとに音高と音響効果を探る。これら一連の研究によって周代青銅鐘の機能性を検証する。

(2) 鐘の形態調査方法

鐘構造把握のための形態調査では、とくに鐘内側の検討を重視する。鐘内側の形状が鐘の鑄型製作上大きな影響を与えると同時に、その打音にも少なからず影響を与えると考えたためである。本研究ではとくにこれまで正確な計測が困難であった内側の形状を明確にし、外形との比較を通して精度の高い構造の把握をおこなう。対象とする周代青銅鐘について、その構造を把握するため、近年土器を中心に活用が増加しているシリコン法(シリコンによる型取)を採用する。精密計測には3次元デジタル計測が近年普及している。これまで泉屋博古館でも、12点の鐘について実施したが、鐘内側については凹凸の関係で計測不能部位が発生し、鐘の内側すなわち鐘

造時の内范(中子)の全体像を完全な形で再現できなかつた。それに対してシリコン型取は、型持部位などに存在する微細な凹凸も忠実に転写できるため、極めて有効である。その構造を把握するためのシリコン型取調査と材質調査をおこなう。対象とする資料は泉屋博古館が所蔵する28点である。は西周中期甬鐘1点、西周後期甬鐘9点、春秋前期甬鐘3点、春秋後期甬鐘1点、戦国前期鈕鐘13点である。内面の構造に時期的な違いがあるのか、あるいは共通の特徴が存在するのかを確認する。それによって、鐘の内范(中子)の製作技法を検討する。

(3) 鐘の材質調査

材質調査には泉屋博古館が所有する卓上型蛍光X線分析装置と携帯型蛍光X線分析装置とを併用した組成分析を実施し、主に銅錫の組成比を検証し、復元鑄造を実施する際の材料組成を決定する。

(4) 復元鑄造及び熱処理

これまでに泉屋博古館が取得した三次元デジタル計測データおよび本研究でのシリコン型取をもとにして、外范(外型)および内范(中子)を芦屋釜の里鑄造工房で製作する。外范については、山西侯馬鑄造遺跡出土の原型および外范を参考にする。また内范については、シリコン型取による検討をベースにして作成を試みる。さらに湯口の位置を決定するための試験的鑄造を実施する。湯口位置は現状でいくつか想定できるため(鈕あるいは甬からの流し込み、本体下部からの流し込みなど)、湯口を変えて鑄造を試み、実物資料との比較をおこない湯口の位置を決定する。鑄造では、材料組成を実物に近い配合の合金を用意し実施する。また、鐘の機能性を解明することを目的として、凸乳の有無、内面調整痕の有無など様々な条件で、同じ形状・規模の鐘を複数個鑄造する。さらにそのうちのいくつかについて熱処理を実施する。

(5) 音高と音響の調査

復元鑄造した鐘について、音高と音響の測定調査を実施する。音声録音には泉屋博古館が所有する高性能マイクを使用し、音声データ解析には音声解析ソフトを使用して、音高(周波数)をグラフ表示し、残響についても音の減衰状況をグラフであらわす。復元した鐘について、音高と音響の測定調査を実施し、データを解析する。異なる条件で製作した鐘でどのような違いが存在するのかを検討する。

以上の調査を通して、周代では甬鐘と鈕鐘とが併存するが、両者で音響的にどのような違いが存在するのか、周代鐘と同一構造の鐘と条件を変えた鐘とでどのような違いが存在するのか、などの検討を行い、周代の鐘が機能的にどのようなレベルにあったのかを考察する。

4. 研究成果

(1) シリコン型取りによる構造の把握

研究協力者の樋口陽介(芦屋釜の里)とともに編鐘12器(戦国時代前期)のシリコン型取調査を実施し、とくに鐘内面のシリコン型について詳細な観察を実施した。さらに型取調査と併行して、携帯型マイクロスコープを利用して、外范と中子を固定する型持部を中心に鐘内面の観察を行った。

シリコン型取の結果、鐘内面が外面と同じカーブで調整されておらず、部位によって厚さが変化していることが判明した。さらに鑄肌が残存するにもかかわらず(携帯型マイクロスコープで確認)、削り痕が多数シリコンに転写され内范(中子)製作の際に削って調整をしたことも明らかになった。また外范(外型)と内范(中子)とを固定するための型持の状況も詳細に観察でき(図1・2)、以下の通り考察をおこなった。



図1 青銅鐘内面シリコン型(上半)



図2 青銅鐘内面シリコン型(下半)

まず中子の製作方法について、中子上方を中心に広い範囲で削り痕が確認できたこと、突起状型持の存在するのが鐘表面の第2篆間で統一されていること(鐘外面紋様区画内に正確に配置されていることを示す) わずかに膨らみをもつ湾曲の変換点がちょうど鐘外面の鈕部と鼓部の境界にあたり、中子全体形状が外范紋様区画に忠実に沿って形成されていること、などから、中子は原型自体あるいは外范に土を込めて抜いたもののいずれかを削ることによって成形したと

考察した。

さらに、外范と中子を固定する型持は、すべて先端が尖った直方形状をしており、その基部周囲に輪郭線がほどこされていた。シリコン型を詳細にした結果、その成型方法は、突起の基部に型持パーツを接着した痕跡が全く無いこと、突起状型持部分の周囲で削りを止めた痕跡が存在することから、突起は型持パーツを中子に接着したのではなく、型持部分を削り残すことによって成形したと考えた。型持周囲に残された輪郭を形成する沈線は、削り出す前の段階、すなわち篆間紋様区画が残った状態の中子に、削り残して突起状型持を設置する部分を明示するためのガイドラインを入れた痕跡であろう。型持となる削り残しを確認しながら、削る厚みを調整していったと推測した。

上記の検討に併せ、他の資料でも内部の構造を観察検証した。同時期資料の内部構造調査については、泉屋博古館収蔵の同時期資料の調査をすすめるとともに、国立中央研究院歴史語言研究所所蔵河南輝県琉璃閣 60 号墓出土編鐘など外部機関所蔵資料の調査を実施し、いずれも鐘内部に突起状型持の痕跡を確認し、研究対象としている泉屋博古館所蔵編鐘の中子制作方法が同時期で広く利用されていた可能性が高いことを確認した。

さらにより古い時期の青銅鐘についても、戦国時代との比較検証のため、その内部を中心に調査を実施した。泉屋博古館所蔵の井仁鐘および號叔旅鐘と同一銘文を有する台東区立書道博物館所蔵の青銅鐘を調査した。その結果、とくに井仁鐘については 2 器ともに舞内中央部分に金属がまわらず、鐘本から要内部までが一連で中空になっていることが観察され、泉屋所蔵品と書道博所蔵品が本来同一セットであるとともに、古い形式を維持していることがわかった。

(2) 復元鑄造

上記で判明した編鐘の中子構造をもとにして、編鐘の中子を復元し、復元鑄造実験を実施した。

まず復元鑄造実験では、第 1 段階として、中子に設けられた突起状型持が有効に機能するかどうかを検証するため、シリコン型から石膏による無分割外范を制作し、それによる鑄造を行った。その結果、突起状型持によって中子はほぼ完全に固定されていることがわかり、さらに注湯後の外面状況を確認したところ、型持によって通常生じる孔が確認できない例が多くみられた。このことから、先端を尖らせた突起状型持を造る中子によって注湯したばあい、型持部に孔を空けることなく器を鑄造することが可能であることが判明した。また本復元実験では、湯口とアガリを鐘両端の銑部と鐘内側が壇状に突出している遂部との 2 通りで設置し、対照実験をおこなった。鐘両端の銑部では、鑄造欠陥が発生したのに対して、遂部では鑄造欠陥が発生せず、後者の方が、湯口とアガリを切断し調整する作業が容易であった。実験数が多くなく、鑄造欠陥の発生率などを厳密に比較するに至っていないが、現状で、湯口とアガリは遂部に設置したと判断した。鑄造実験の第 2 段階とした分割范制作については、分割鑄型の試作およびスタンプによる単位文様の試作を実施した。



図 3 復元鑄造品

これらの実験により、明らかになった青銅鐘の鑄型構造をもとにして、芦屋釜の里において分割范による青銅鐘の復元を実施した。その結果分割面に著しい鑄バリが挿したものの、鑄造欠陥がほとんど認められない復元品を鑄造することができた（図 3）。

(3) 熱処理および音高・音響測定調査

上記で鑄造した復元品に熱処理を加え、それによって音高・音響にどのような変化がみられるのかを検証した。

熱処理については、先行研究を参考にしながら、4 点について電気炉を用いて処理した（器全体が一様に熱を受ける）。さらに編鐘が製作された春秋戦国時代の熱処理に近い状況を再現するため、2 点について燃焼する木炭のなかに器を埋め込んで処理を試みた（器本体のみ加熱、鈕は空气中に露出。推測ではあるが、この方法の方が当時の熱処理方法に近いと考えた）。さらにそれぞれ徐冷と急冷を実施した。その結果、後者の燃焼木炭埋め込みによる熱処理では、2 点のうち 1 点について処理中にクラックが入り処理に失敗した。

音高と音響の検証は、実際に対象資料を紐でつるして叩き、およそ 10 cm 離れたマイクで音声を収録し、その音声データを NHCS software の WAVEPad により、周波数分析と時間周波数分析をおこなった。その結果、電気炉による熱処理と木炭埋め込みによる処理とでは、比較資料数が極めて少なかったこともあり、有意な差異を認めることができなかった。なお編鐘は遂部と鼓部とで音高が変化するように設計されている。遂部に比べ鼓部が音階ほど高くなるが、今回の周波数測定では、ほぼすべての対象資料で、叩いてから 3 秒程度は、650Hz 前後（E5 付近）と 870Hz 前後（A5 付近）の 2 音が併存する、すなわち遂音（650Hz 前後）と鼓音（870Hz 前後）が混在する状況が確認できた。混在の状況は叩く位置により変化することもわかった。また熱処理をかけた方が混在する時間が短く、一つの音階に収斂した残響が続く可能性が高いこともわかった（図 4・5）。

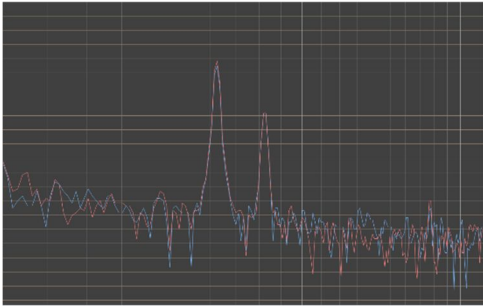


図4 叩いて2秒後の周波数

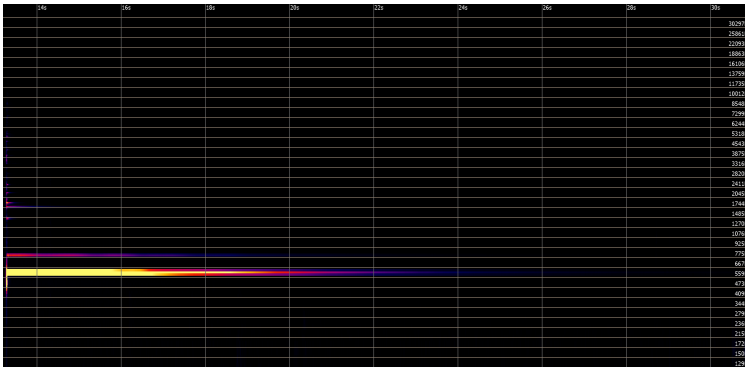


図5 経過時間周波数

ただ、復元鑄造の際に、中子のずれなどにより鐘の厚さが不均一になってしまったものなどがあり、検討するための復元品の数量確保が不十分であったため、比較対象資料数が乏しく、あくまでも見通しを把握するにとどまった。今後さらに個体差の少ない復元鑄造品の数を増やし、検証していく必要がある。

<引用文献>

湖北省博物館ほか 1992 『曾侯乙編鐘研究』、湖北人民出版社

- ② 岡村秀典 1986 「編鐘の設計と構造 - ㊦氏編鐘を中心に 」 『泉屋博古館紀要』第3巻、33～49頁。
- 高橋準二 1986 「㊦氏編鐘におけるピッチとサイズの関係」 『泉屋博古館紀要』第3巻、50～59頁。
- 高橋準二・植田公造 1986 「先秦時代の鐘の音高測定」 『泉屋博古館紀要』第3巻、60～61頁。
- 高橋準二 1988 「者㊦鐘の音高測定」 『泉屋博古館紀要』第5巻、42～44頁。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 廣川守、樋口陽介、八木孝弘、新郷英弘、丹羽崇史	4. 巻 33
2. 論文標題 ヒョウ氏編鐘の中子構造	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 泉屋博古館紀要	6. 最初と最後の頁 61-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣川守、樋口陽介、八木孝弘、新郷英弘、丹羽崇史
2. 発表標題 東周時代の鐘の中子製作技法
3. 学会等名 アジア鑄造技術史学会2017台北大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------